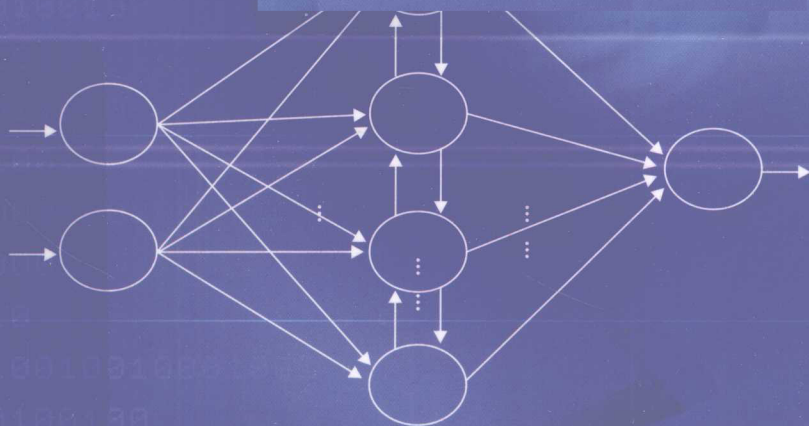


张雨浓 杨逸文 李巍 © 著

神经网络权值 直接确定法

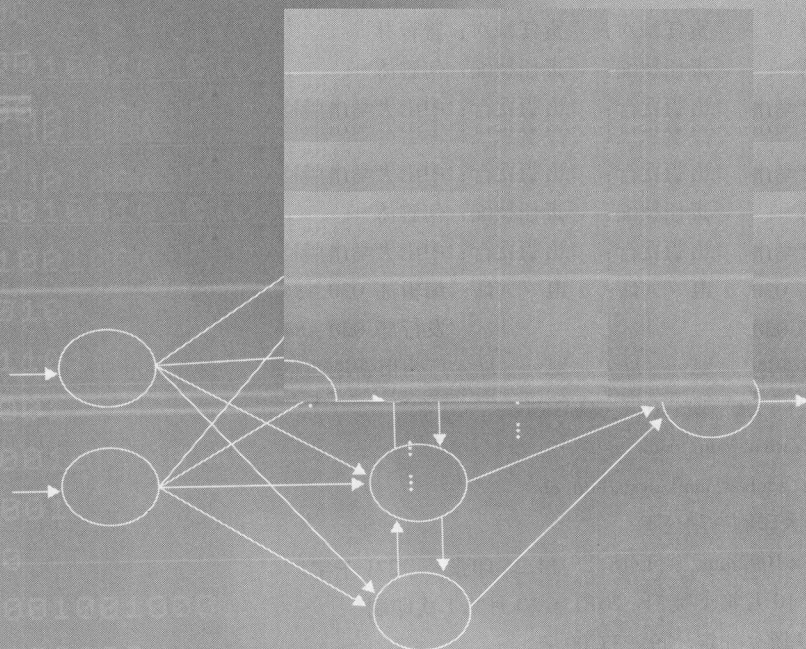
Weights Direct Determination of Neural Networks



中山大学出版社

张雨浓 杨逸文 李巍 © 著

神经网络权值 直接确定法



中山大学出版社

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目(CIP)数据

神经网络权值直接确定法/张雨浓, 杨逸文, 李巍著. —广州: 中山大学出版社, 2010. 10

ISBN 978 - 7 - 306 - 03747 - 3

I. ①神… II ①张… ②杨… ③李… III. 神经网络—研究 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 189130 号

出 版 人: 祁 军

策划编辑: 张礼凤

责任编辑: 张礼凤

封面设计: 曾 斌

责任校对: 曾育林

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84111997, 84113349, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn>

E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广州中大印刷有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 14.25 印张 271 千字

版次印次: 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

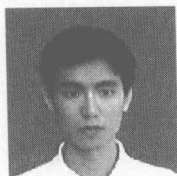
印 数: 1 ~ 2000 册 定 价: 38.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

作者简介



张雨浓, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1973 年 10 月生。1992 年至 1996 年在华中理工大学攻读学士学位; 1996 年考入华南理工大学攻读硕士学位, 期间荣获多项奖励, 如西门子奖学金和南粤优秀研究生奖学金。1999 年至 2002 年在中国香港中文大学攻读博士学位, 期间发表 6 篇 *IEEE Transactions* 杂志论文和 3 篇其他杂志论文, 并荣获香港 Lee Hysan 研究生奖学金。2003 年完成博士学业之后, 在新加坡国立大学电力与计算机工程系做博士后研究, 主要研究领域为时变求逆的神经网络和冗余机器人系统。2004 年前往英国斯杰科莱大学任研究员 (Research Fellow), 主要研究领域为高斯过程回归及其快速算法。2005 年初, 转往爱尔兰国立大学梅驾斯分校哈密顿研究所任研究科学家/研究员 (Research Scientist/Research Fellow)。2006 年 6 月受聘于中山大学信息科学与技术学院, 任“百人计划”教授, 主要研究领域为冗余机器人、递归神经网络和高斯过程计算及优化研究等。多次参加和参与组织国际学术会议并担任小组主席等职务。迄今, 共发表中英文论文 140 余篇, 其中在 *IEEE Transactions* 上发表论文 10 篇 (含 *IEEE Transactions* 长文 6 篇), 被 SCI 收录 30 余篇, 被 EI 收录 80 余篇。



杨逸文, 男, 在读硕士, 1986 年 8 月生。2005 年至 2009 年在中山大学软件学院攻读学士学位, 期间获得多项奖励, 如中山大学优秀学生一等奖学金、镇泰奖学金、惠普奖学金和国家奖学金等。2009 年至今在中山大学信息科学与技术学院攻读硕士学位。主要研究领域为神经网络、系统优化和冗余机器人。共发表中英文论文 8 篇, 被 EI 收录 4 篇。



李巍, 男, 1987 年 1 月生。2007 年获得中山大学电子信息科学与技术专业学士学位, 2009 年获得中山大学通信与信息系统专业硕士学位。在学习期间获得过中山大学研究生奖助金、镇泰奖学金等多项奖励。攻读硕士学位期间主要研究方向为人工神经网络。共发表中英文论文 8 篇, 被 SCI 收录 1 篇, 被 EI 收录 2 篇。

前言

神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是模拟生物神经系统的组织结构、处理方式和系统功能的简化人工系统;是一门涉及面广、综合性强、有半个多世纪研究历史的跨领域交叉学科,涉及自动化、电子工程、计算机科学、数学、统计学、神经生物学、心理思维科学等众多相关学科;由于其并行计算、分布式存储、高度容错、非线性自适应处理能力等显著特点,在模式识别、智能控制、组合优化、系统辨识与预测以及智能信息处理等领域都得到广泛的成功应用。20世纪80年代中期以来,神经网络(简称“神经网络”)研究不断地涌现出新的热潮,我国学术界也开始更深入地关注和引领该领域的研究与发展。近20年来,神经网络的理论研究和实际应用在许多领域取得了显著的进展,在国内外都进入了一个蓬勃发展的新时期。

在神经网络理论日渐成熟,它的应用逐渐扩大和深入的形势下,如何把握神经网络新的研究方向,向读者以及广大神经网络研究者介绍神经网络系统理论的最新发展,成为神经网络教科工作者面临的一大挑战。本书系统化地阐述了笔者在人工神经网络方面的最新研究成果,既给读者提供了神经网络研究中的新方向、新思路、新视角,又给出了一个相对全面的介绍,可供相关领域研究人员、教师、学生参考。

通过分析、探讨传统学习型神经网络及其算法存在的诸多尚未解决的内在不确定性问题,从神经生物学角度出发和思考,在函数逼近论相关知识点启发下,本书提出了一种神经网络权值直接确定的方法。不同于传统的神经网络迭代学习思想,新方法可以一步直接计算出学习型神经网络的最优权值,展示其在计算速度和学习精度方面的优越性。考虑到人工神经网络拓扑结构与其性能有着密切的关系,因此,围绕网络结构(隐神经元数)进行性能优化一直以来都是人工神经网络研究的一个重要方向;基于提出的权值直接确定方法,本书提出了神经网络结构(隐神经元数)最优确定算法,从而可以快速确定性地得到神经网络的最佳(或较佳)拓扑结构。

此外,本书所阐述的是一套从激励函数选取、人工神经网络构建、权值直接确定到结构自确定的相对完备和统一的神经网络确定性理论,对其他相关学者的研究汇总工作也具有一定的启发借鉴意义。同时,在著述上采用了分析和综合已

有成果、循序渐进、环环相扣却又各章节相对独立的撰写思路，既有利于读者通读又有利于选读。

全书共分 10 章：第 1 章是概述，从基本概念、发展历史以及应用等各方面，对人工神经网络进行了概述；第 2 章对传统人工神经网络及其学习算法进行了必要的介绍；第 3 章主要介绍误差回传(BP)神经网络及其特性，并探讨了其他学者对标准 BP 算法的改进；第 4 章至第 7 章提出了权值直接确定的方法，并给出了基于多种神经网络模型的仿真验证实例。第 8 章至第 10 章在权值直接确定方法的基础上，进一步提出了神经网络结构(隐神经元数)最优确定算法。

本书适用于自动化、电子、计算机科学、数学和其他相关工程专业的研究人员、研究生，也可以作为对人工神经网络领域感兴趣的工程技术人员的参考辅导书。

本书的出版得到了中央高校基本科研业务费专项资金的资助，在出版的过程中还得到了中山大学出版社张礼凤编辑积极的帮助和认真负责的编辑整理，在此表示诚挚的感谢与致礼。也值得指出的是，本书的完成是基于著者和相关学生、同事近年来发表的许多原始论文，其中的合作者也一样做了大量细致的、开创性的科研工作，尤其是李克讷、谭宁和阮恭勤等同学既参与了原始论文的创作，也对本书部分内容及文字校对付出了辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢。

限于作者学识，书中错误之处难免，诚挚地希望广大师生、专家学者提出批评意见。

张雨浓 杨逸文 李巍

2010 年 7 月 1 日

目 录

第1章 人工神经网络概述	1
1.1 神经网络的基本概念	1
1.1.1 什么是人工神经网络	1
1.1.2 人工神经网络的生物学基础	3
1.1.3 人工神经元模型	7
1.1.4 人工神经网络模型	11
1.1.5 神经网络学习算法	15
1.2 神经网络发展简史	18
1.3 神经网络应用	21
1.3.1 模式识别	21
1.3.2 自动控制	22
1.3.3 信号处理	22
1.3.4 人工智能	22
参考文献	23
第2章 传统神经网络及学习算法	27
2.1 感知器	27
2.1.1 简单单层感知器网络	27
2.1.2 单层感知器神经网络	28
2.1.3 单层感知器的有教师学习算法	29
2.1.4 单层感知器网络的局限性	30
2.2 径向基网络	30
2.3 Hopfield 神经网络	32
2.4 误差回传(BP)神经网络	37
2.5 MATLAB 神经网络工具箱	37
参考文献	39

第3章 BP神经网络	45
3.1 BP神经网络的发展	45
3.2 BP神经元及神经网络模型	46
3.3 BP神经网络学习算法	48
3.3.1 信号的正向传递	48
3.3.2 BP学习算法的误差反向传播与权值阈值更新增量	49
3.3.3 网络权值阈值更新公式	49
3.4 BP神经网络的局限	50
3.4.1 局部极小点	50
3.4.2 学习/收敛速度慢	51
3.4.3 网络结构难以确定	51
3.5 标准BP算法的改进	52
3.5.1 增加动量项的BP学习算法	52
3.5.2 可变学习率的BP算法	52
3.5.3 弹性BP学习算法	53
3.5.4 共轭梯度法改进	53
3.5.5 Levenberg-Marquardt 算法	54
3.6 计算机简单示例	54
参考文献	59
第4章 权值直接确定法	62
4.1 相关数学基础	62
4.1.1 最佳逼近理论	62
4.1.2 多元多项式的逼近理论	64
4.1.3 矩阵伪逆与线性方程组求解	65
4.2 幂激励前向神经网络	66
4.2.1 网络模型与理论基础	66
4.2.2 基于BP算法的迭代公式	68
4.2.3 权值直接确定公式	71
4.2.4 计算机仿真实例	72
4.2.5 小结与思考	76
参考文献	77
附录	78

第5章 权值可直接确定的神经网络模型(一)	83
5.1 正交多项式激励函数	83
5.2 Hermite 正交多项式神经网络	86
5.3 Chebyshev 正交多项式神经网络	93
5.4 Jacobi 正交多项式神经网络	101
5.5 小结与思考	108
参考文献	109
第6章 权值可直接确定的神经网络模型(二)	110
6.1 Fourier 级数及逼近	110
6.2 Fourier 三角基神经网络	113
6.3 Fourier 复指数基神经网络	119
6.4 小结与思考	126
参考文献	126
附录	128
第7章 权值可直接确定的其他神经网络模型	132
7.1 Padé 有理式神经网络	132
7.2 样条神经网络	138
7.3 小结与思考	146
7.3.1 相对 BP 算法的突破	146
7.3.2 对网络激励函数的要求	147
7.3.3 理论与应用上的新意	148
参考文献	148
第8章 神经网络结构自确定	150
8.1 神经网络的拓扑结构	150
8.1.1 简单前向神经网络结构	150
8.1.2 带反馈的前向神经网络结构	151
8.1.3 层内互连的前向神经网络结构	151
8.1.4 反馈神经网络结构	152
8.2 隐神经元数对前向网络性能的影响	152
8.3 传统网络结构调整方法	154

8.3.1	基于信息熵的隐神经元数估计法	154
8.3.2	基于 LMBP 改进算法的神经网络结构优化	155
8.3.3	基于黄金分割的优化算法	155
8.3.4	剪枝算法	155
8.3.5	基于遗传算法的网络结构优化	155
8.3.6	代数方程优化法	155
8.4	动态结构神经网络的实现	156
8.4.1	动态增添神经元算法	157
8.4.2	动态删减神经元算法	157
8.4.3	计算机仿真与展示	159
8.4.4	计算机应用示例	163
8.5	神经网络最优结构确定	169
	参考文献	171
第 9 章 基于权值直接确定法的网络结构自确定算法		174
9.1	Chebyshev 神经网络结构自确定	174
9.2	Legendre 神经网络结构自确定	180
9.3	Gegenbauer 神经网络结构自确定	185
9.4	结构自确定法的适用范围和应用意义	194
	参考文献	195
	附录	197
第 10 章 多输入神经网络权值与结构确定		199
10.1	多输入多项式神经网络模型	199
10.2	多输入多项式神经网络权值直接确定	200
10.2.1	权值迭代修正公式	200
10.2.2	全局收敛性质及最优权值直接求解	203
10.2.3	计算机仿真验证及与 BP、RBF 神经网络性能对比	204
10.3	多输入多项式神经网络的结构自确定	207
10.4	小结与思考	209
	参考文献	210
	附录	211

第1章 人工神经网络概述

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN, 以下如无特别指出, 则简称“神经网络”, NN) 是模拟生物神经系统的组织结构、处理方式和系统功能的简化系统^[1,2]; 是人工智能的一个分支, 是一门始于 20 世纪 40 年代的新兴交叉学科, 涉及数学、电子与控制、计算机科学、脑科学、神经生理学、认知科学、非线性动力学等众多学科领域^[3]。众所周知, 人类大脑是思维活动的物质基础, 而思维是人类智能的集中体现。长期以来, 人们试图了解人脑的工作机理从而模仿人脑的功能^[4-7]。人工神经网络就是这样一类由大量处理单元 (神经元) 广泛互连而成的网络, 是对人脑的抽象、简化和模拟, 试图反映人脑的基本特性^[8]。自 1943 年第一个神经元模型——M - P (McCulloch-Pitts) 模型被提出以来, 人工神经网络研究经历了曲折的发展过程, 迄今已建立了数十种甚至更多的网络模型, 并以其特有的并行处理、分布式存储、自适应自组织自学习和高度容错能力而受到广泛关注, 是近年来的热点研究领域之一^[9,10], 其应用范围更是涉及前述的计算机科学与技术、信息与通信工程、电气工程、人工智能、模式识别和控制工程等诸多学科和领域^[8,11-16]。

1.1 神经网络的基本概念

本章下文将介绍人工神经网络的基本概念, 以期读者有个轮廓性的了解, 也为以后各章的具体讨论奠定相关的背景知识和基础。

1.1.1 什么是人工神经网络

人脑是生物进化的最高产物, 是人类智能、思维和情绪等高级精神活动的物质基础^[17]。现代科学的发展使得人类有条件对大脑的神经网络进行分析和研究, 从而揭示人脑的工作机理, 了解神经系统的工作本质。依据脑科学和神经生理学, 我们可以得到如下共识: 神经元是布满在人类大脑皮层上的神经细胞, 神经元之间彼此广泛互连从而形成生物神经网络; 人脑神经网络以生物神经元为基本处理单元, 对信息进行分布式存储与加工^[4-7]; 构成神经系统的神经元采用群体协同的工作方式, 从而使得人脑呈现出了神奇的智能^[1-4]。

长期以来,人们期望能够设计出模仿人类大脑工作的人工智能系统,而计算机就是其中一个例子。但在进行推理、识别、联想、决策时,现代计算机还无法像人脑那样在很短的时间内完成类似的任务。因此,人们希望能够找到这样一种系统,它既拥有强大的计算能力,又可以像人一样完成推理、识别、联想和决策的任务^[17]。而基于对人脑的基本认识,从信息处理的角度对人脑进行合理抽象并建立某种公式化的数学模型,来达到模拟人脑神经网络的信息存储和处理机制的目的,无疑是一种很有希望的人工途径。人工神经网络正是基于这样一种思想而产生的。目前,关于人工神经网络的定义尚不完全统一,综合其来源、特点及各种解释,多数人能够接受的一个定义是:人工神经网络是指由大量人工神经元互连而成的非线性自适应动力系统,是一种旨在模仿人脑结构及其功能的人工信息处理系统^[4-17]。具体而言,建立这样一个人工神经网络,就是将大量物理可实现的、与生物神经系统之神经细胞类似的人工神经元有机地连接起来并使它们并发地进行工作,从而组成一个大规模的非线性自适应动力学系统来模仿人脑的结构和学习人脑的功能。值得指出的是,人工神经网络并不是人脑生物神经网络的真实写照,而仅仅是对它的某种或某些意义上的简化、抽象和模拟。人工神经网络的学习不依赖于对象/目标/数据的精确数学模型,它通过许多简单的函数映射关系来实现复杂的网络逼近功能,其复杂的、并行的、分布式存储的非线性动力学性质则在更高的层面上(相比于冯·诺依曼计算机结构)模拟和体现了人脑的智能和功能^[4,17]。

目前已提出了数十种甚至更多的人工神经网络模型,这些简化模型在某种程度上能够成功地反映出人脑的某些(甚至许多)基本特性。它们在人工智能、模式识别、信号处理、自动控制、故障诊断等诸多领域已成功地解决了许多现代计算机依赖确定型程序难以解决的实际问题,让人们看到了人工神经网络良好的智能特性和广泛的应用前景^[4-16]。另外,人工神经网络也具有并行性、本质非线性、分布式存储、自学习自组织自适应和联想记忆能力,给人工智能带来了许多新的视角和方向^[7,18]:第一,神经网络具有本质的并行结构,因此在对实时性要求较高的自动控制领域可显示出极大的优越性;第二,利用人工神经网络可以将非线性系统描述为一种统一的数学模型;第三,神经网络可以处理那些难以用模型或规则描述的过程、数据、对象和系统(通过反复的学习和训练,人工神经网络能够达到精确的处理目的);第四,神经网络具有很强的信息综合和处理能力,这使得它在复杂控制、智能决策和专家系统等方面均具有很大的优势。神经网络所具有的各类特征可以归纳为结构特征和功能特征^[4]。并行处理、分布式存储与容错性这些特征可以更多地理解为结构特征。众所

周知,人脑神经元之间传递脉冲信号的速度远低于冯·诺依曼计算机的工作速度:前者为毫秒量级,而後者的时钟频率可达 10^7 赫兹(Hz)或更高(对应为十分之一微秒数量级或更小)。但人脑是一个复杂的大规模并行处理系统,因此在许多问题上可以做出快速思考、判断、决策和处理,其速度是串行结构的冯·诺依曼计算机所无法比拟的^[19]。人工神经网络的基本结构模仿人脑,由大量人工神经元相互连接而成,网络中每个神经元都可根据收到的信息进行独立运算和处理,然后输出结果并传递给下一层作进一步处理。这样,即使单个神经元结构简单、功能有限,但大量神经元大规模群体协同工作使得该网络系统所能实现的行为是极其丰富多彩和快速灵敏的^[4,20]。结构上的并行性使得神经网络的信息存储必然采用分布方式,即利用神经元之间的连接及其权值表示特定信息(也即神经网络将信息存储分布于网络的不同位置)^[4-7]。这样所带来的好处是,在局部网络受损或输入信号因各种原因发生部分畸变时仍能保证网络整体相对正确地输出,从而提高了网络的容错性和鲁棒性^[20]。这就像人脑,虽然每时每刻都有大量的(未知位置上的)神经细胞死亡,但并不影响人类大脑的整体功能;或者即使大脑局部受损引起功能衰退,但大脑并不会完全丧失信息处理功能^[19]。当需要获得或利用已存储的前期知识时,脑神经网络则在输入信号的激励下采用“联想”的方式进行“回忆”,也就是所谓的联想记忆功能^[4]。神经网络内在的计算并行性与存储分布性使得神经网络表现出良好的容错性。生物神经网络既包含空间上的容错性也包含时间上的容错性,人工神经网络模型就理论而言与人脑在结构上具有某些同构型,也具有良好的容错性^[4,18,21]。

神经网络的功能特征包括自学习、自组织与自适应性。自适应性是指一个系统能够改变自身性能以适应环境的变化,自适应性广义上包含了自学习和自组织两层含义。人工神经网络的自组织能力是建立在其学习能力之上的,在形式上通过结构和数据的自组织来实现^[4,22-24]。神经网络自学习和自组织的性质使其在处理信息时便于综合、聚类、推广和联想。一般而言,神经元之间的连接权值通过神经网络对训练样本的学习而不断调整变化,并且随着训练样本总量和训练次数的增加,某些神经元之间的连接权值会不断增加(也即连接强度增加),从而增强了神经网络对这些样本特征的反应灵敏度^[20]。

1.1.2 人工神经网络的生物学基础

人工神经网络是受人脑的启示而产生的,所以有必要对人的脑细胞及其网络系统的结构和功能做一些简单介绍^[1]。限于笔者学识,本小节的内容不可能也没有必要涵盖大脑神经系统的方方面面,因此只对其与人工神经网络研究较为相

关的部分加以介绍^[21]。

众所周知,人有非常丰富的情感,如快乐、痛苦、焦虑、紧张、恐惧等,这些情感功能主要是由脑神经细胞及其网络决定的^[25-28]。人的中枢神经系统由脑和脊髓组成,脑包括大脑、小脑和脑干三部分^[1,29]。人脑是世界上最精密的器官之一,也是人的智能活动的物质基础^[30]:大脑表面有几条明显的沟,最显眼的是正中一条纵向沟,称为大脑纵裂,它将大脑不完全地分成左右两个半球^[1];大脑表面还有两条明显的横向沟和一条斜向沟,以这几条沟为界,将大脑分成几部分,分别叫做额叶、顶叶、枕叶和颞叶^[1];大脑左右两个半球由卷曲的大脑皮层所覆盖,大脑皮层上有些部分呈回旋状,被称为脑回^[1]。另外,大脑可以粗分为左脑和右脑,其中左脑主要完成抽象思维,右脑主要完成形象思维^[21]。1981年诺贝尔医学生理奖得主罗杰·斯佩里教授就对左右脑的功能差异作了归类和整理,有兴趣的读者可以参考各类相关文献(如本章[31-33])。值得指出的是,对大脑神经系统的研究发现,大脑还可以进一步细分为52个功能区,各个功能区完成的功能各不相同。每个功能区均包含着许多神经元群,每个神经元群完成相应功能区的特定功能^[21]。神经元群是由大量的神经元(又称神经细胞)组成的,各神经元之间相互连接从而形成高度复杂的神经网络(或神经元群)^[21]。

神经生理学和神经解剖学的研究表明,神经元是脑组织的基本单元,也是神经系统的基本组成单位。神经元是一种高度分化的细胞,神经元与人体中其他细胞的关键区别在于具有产生、处理和传递信号的能力,也是人体内唯一能够感受刺激和传导冲动的细胞^[1,20]。据估计,人类大脑大约包含有 1.4×10^{11} 个神经元,每个神经元与 $1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ 个其他神经元相连接,神经元之间传递着彼此间的兴奋与反兴奋(即抑制)。全部大脑神经元构成拓扑上极其庞大而复杂的网络,即生物神经网络,并由这一网络来实现记忆与思维^[4,25]。神经元的周围布满神经胶质细胞:它们形态多样,而且数目也很大,为神经元个数的10~50倍。神经胶质细胞分布于神经元之间,是神经组织中的支持细胞,它们支持和滋养神经元,担负着代谢物质的传递、支持和绝缘作用,并且当神经元受到损伤时可起护卫作用^[1,21]。另外,值得指出的是,目前的人工神经网络,无论其规模还是复杂度都远远不足与人脑的生物神经网络相提并论,但它们大体上是效仿脑神经网络的连接结构和功能而形成的^[25]。

神经元的形态虽然多种多样,但基本上都是带有突起的细胞^[1]。一个生物神经元的构造如图1.1所示^[1,25],主要由细胞体、树突和轴突三部分组成。细胞体又由细胞核、细胞质、细胞膜等组成,细胞体直径为5~100 μm ,细胞膜厚度

为 5 ~ 10 nm。细胞体是神经元的营养中心，有圆形、卵形、梭形和锥形等。一般每个神经元从细胞体伸出一根粗细均匀、表面光滑的突起，称为轴突，其长度从几微米到 1 m 左右^[1,20,21]。我们通常所说的神经（也即神经干），是由成千上万根轴突（又称神经纤维）所组成。轴突在其起始部附近可有分支发出，而在邻近其终端处常有广泛的分支，这些细的分支称为轴突末梢或神经末梢，神经末梢可以向四面八方传出信号，相当于细胞体的输出端^[4-7,20,21,34]。轴突的功能是向外传出从细胞体来的神经信息。而从细胞体延伸出像树枝一样四处散开的许多突起，称为树突。树突通常短而粗，分支多，状如树枝。不同的神经元其树突的数量也不相同，树突的功能主要是感受刺激，接受从其他神经元传递来的神经信号，相当于细胞体的输入端^[1,4,20]。另外，神经末梢（也即轴突末梢）与其他神经元（主要经树突）相连接的末端称为突触。神经元之间的连接是靠突触实现的，这种连接相当于神经元之间的输入输出接口^[4-7,20]。突触由突触前、突触间隙和突触后三部分组成，每个神经元有 $1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ 个突触。突触是神经元之间传递神经信号的接触点，神经信号在突触处的传递是单向的。一个神经元可以和一个或多个神经元形成突触，主要的形式是轴突 - 树突，但也有轴突 - 细胞体、轴突 - 轴突、树突 - 树突等其他连接形式^[1,4-7,20]。

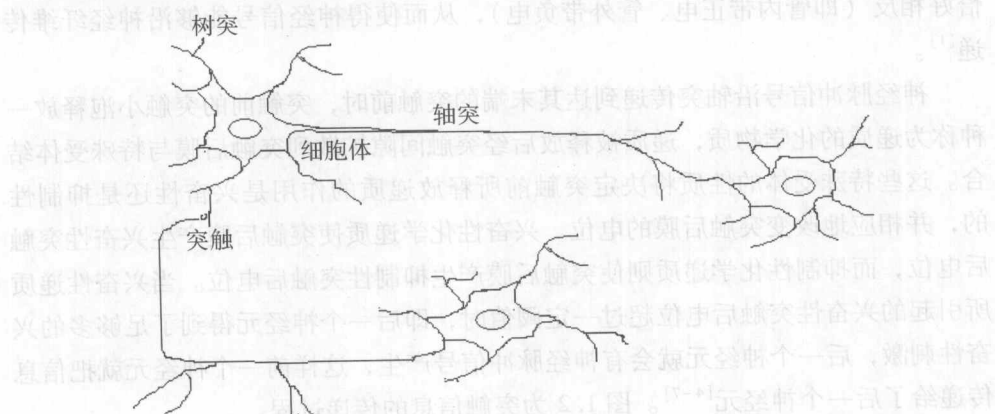


图 1.1 生物神经元的结构^[1,8,25]

简单来说，在生物神经元中，树突和细胞体负责接收输入信号；细胞体联络和整合输入信号并发出输出信号，相当于一个微型处理器，同时还负责细胞总的给养。轴突作为输出器，传输细胞体发出的输出信号到轴突末梢，轴突末梢再通过突触把信息分发给一组新的神经元。神经元之间信息的产生、传递和处理是一组电化学活动^[4-7,21]。

下面介绍一下神经元产生和传输信号的机理。

神经元的细胞膜对不同离子具有不同的通透性，从而造成膜内外存在离子浓度差，进而造成电位差。神经元在无神经信号输入时细胞膜的状态称为极化状态，此时细胞膜内外的电位差为 -70mV （内负外正）左右，称为静息电位。当神经元受到刺激时，如果膜电位从静息电位向正偏移，此时神经元为兴奋状态；而如果膜电位向负偏移，则神经元为抑制状态。在任一时刻，神经元总是处于静息、兴奋和抑制三种状态之一^[4-7]。如果在一定的时间间隔内，某一神经元接收到足够多的兴奋信号，则该神经元将被激活从而产生一个神经脉冲信号。神经元产生的各脉冲的宽度和幅度都大致相同，而脉冲的间隔是随机变化的。并且，如果增加兴奋信号输入的密度，则神经元产生的输出脉冲信号的密度也会随之增加，也就是说，神经元的兴奋程度决定了其输出神经脉冲信号的频率^[4-7,21]。

一根神经纤维好比一个圆管，管内外是 NaCl 和 KCl 的混合溶液，存在着 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 三种离子。管内的钾离子浓度比钠离子浓度高；管外刚好相反，钾离子浓度比钠离子浓度要低。在没有神经信号通过时，管内负离子数目多于正离子数，带负电；管外相反，带正电。轴突内外呈现静息态，管内外的电位差为静息电位差。一个神经信号实际上是管内一个带电区间，只是与静息部分的电位恰好相反（即管内带正电、管外带负电），从而使得神经信号能够沿神经纤维传递^[1]。

神经脉冲信号沿轴突传递到达其末端的突触前时，突触前的突触小泡释放一种称为递质的化学物质，递质被释放后经突触间隙扩散到突触后膜与特殊受体结合。这些特殊受体的性质将决定突触前所释放递质的作用是兴奋性还是抑制性的，并相应地改变突触后膜的电位。兴奋性化学递质使突触后膜产生兴奋性突触后电位，而抑制性化学递质则使突触后膜产生抑制性突触后电位。当兴奋性递质所引起的兴奋性突触后电位超过一定阈值时，即后一个神经元得到了足够多的兴奋性刺激，后一个神经元就会有神经脉冲信号产生，这样前一个神经元就把信息传递给了后一个神经元^[4-7]。图 1.2 为突触信息的传递过程。

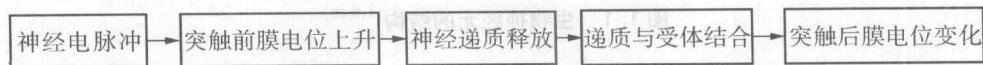


图 1.2 突触信息的传递过程^[4,29]

一个神经元可以接受多达上千个其他神经元传来的脉冲输入，它们到达神经

元的部位各不相同,对神经元影响的权重也不同。输入一个神经元的信息在时间和空间上常呈现一种复杂多变的形式,这就要求神经元必须具有对这些信息进行综合、整理和加工的能力。大量的生物神经元以一定的方式和拓扑结构相互连接而形成的生物神经网络则是一种更为庞大、精密和复杂的生物信息处理系统。值得指出的是,生物神经网络的功能并不是单个神经元信息处理功能的简单叠加,任何一个单独的突触连接都不能完全表现一项信息,而是构成生物神经系统的神经元群体协同地大规模并行工作,才使得人脑在宏观上呈现出了千变万化的复杂的智能信息处理能力^[1,4-8,18-21]。

1.1.3 人工神经元模型

神经元是神经网络的基本组成单元,因此,模拟生物神经网络首先应当模拟生物神经元。目前,人们已经提出数十种甚至更多的人工神经元模型,其中提出时间最早且影响最大的,是1943年心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 提出的 M-P 模型^[4]。

根据第1.1.2节的知识,我们可将神经元作如下简单描述^[1,4,25,34]: 一个神经元可以建模为一个输入(感知)器,一个加权求和(信息汇聚)器,一个传递(信息传输)器和一个输出(响应)器。并且神经元具有如下基本特征:①神经元是一个多输入单输出(可以广泛互连)的信息处理单元。神经元接收来自其他神经元的神经输入信号/刺激,并产生神经输出响应。②神经元具有非线性的输入输出特性。③神经元具有可塑性,主要体现在神经元之间连接强度的变化:连接强度的大小决定了信号传递的强弱,连接强度可随训练情况而改变。④神经元具有空间整合特性和阈值特性:每个神经元有一个阈值,神经元根据输入信号的积累效果(相比于阈值)产生相应的响应;换言之,神经元的输出响应是各个输入值综合作用产生的结果。⑤神经元输入信号可以起刺激作用,也可以起抑制作用,即输入可分为兴奋型(正值)和抑制型(负值)两种。

1986年Rumelhart等学者研究和列举了并行分布处理(Parallel Distributed Processing, PDP)模型的八个方面,来说明各种神经网络的构成原理和特征。这八个方面分别是处理单元集合、单元集合的激活状态、各单元的输出函数、单元之间的互连模式、传递规则、激活规则、学习规则、系统工作环境^[1,19,25]。PDP模型中神经元的一般结构如图1.3所示。